



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

INOVACE VÝROBY CNC OBRÁBĚNÍ DISKOVITÝCH SOUČÁSTÍ

AN INNOVATION OF THE CNC PRODUCTION OF THE DISC-SHAPED PARTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MAREK KŘUPKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Marek Křupka

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Inovace výroby CNC obrábění diskovitých součástí

v anglickém jazyce:

An innovation of the CNC production of the disc-shaped parts

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá inovací výroby CNC obrábění diskovitých součástí, zvláště aplikacemi nových řezných nástrojů a použitím vyšších řezných rychlostí.

Cíle diplomové práce:

1. Úvod
2. Teoretický rozbor problému
3. Návrh inovovaných technologických řešení
4. Experimentální ověření
5. Rozbor výsledků
6. Závěr

Seznam odborné literatury:

HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha. MM publishing s. r.o. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.

DAVIS, J.R. Tool Materials. ASM Specialty Handbook. ASM International, Materials Park, Ohio, 1998, 2nd. ed., pp. 501, ISBN: 0-8170-545-1.

DUDZINSKI, D., SCHULTY, H. Metal Cutting and High Speed Machining. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2001, 1st. ed., pp. 490, ISBN 0-306-46725-9.

BARÁNEK, I., ŠANDORA, J.: Výroba vybraných súčiastok špeciálnej techniky. TnUAD, Trenčín, 2004 s. 212, ISBN 80-8075-013-0.

TLUSTY, J. Manufacturing Process and Equipment. 1st edition. Prentice Hall, 1999. 928 s. ISBN 10-0201498650.

PTÁČEK, L. Nauka o materiálu I. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, tisk FINAL TISK Olomoučany, 2001, 1. vyd., 516 s., ISBN 80-7204-193-2.


PTÁČEK, L. Nauka o materiálu II. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, tisk FINAL TISK Olomoučany, 2001, 1. vyd., 360 s., ISBN 80-7204-130-4.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 5.11.2012




prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Optimální volba řezných podmínek, stejně tak jako řezného nástroje, má výrazný vliv na kvalitu obráběné součásti a je základním parametrem ke snížení nákladů výroby. Tato práce se věnuje CNC soustružení talířových pružin a jejím cílem je inovovat výrobu součásti z materiálu 51CrV4, zejména pomocí aplikace nových řezných nástrojů a použitím vyšších řezných rychlostí. Bude provedeno porovnání čtyř výrobců řezných nástrojů z hlediska dosažené jakosti povrchu, dráhy špičky nástroje a obrobeného objemu materiálu. Bylo experimentálně ověřeno, že námi navrhovaný nástroj dosáhl nejlepšího výsledku.

Klíčová slova

CNC obrábění, řezný nástroj, řezná rychlost, pružinová ocel, drsnost povrchu, silová analýza

ABSTRACT

The optimal choice of cutting conditions, as well cutting tool, has a significant effect on the quality of machined part and is an essential parameter to reduce the cost of production. This thesis describes CNC turning process of disc springs made of 51CrV4 material, especially using new cutting tools and the use of higher cutting speeds. A comparison of four manufacturers of cutting tools in terms of surface quality, tool path and the machined material volume will be introduced. It was experimentally verified that our proposed facility has achieved the best result.

Key words

CNC machining, cutting tool, cutting speed, spring steel, surface roughness, force analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KŘUPKA, M. *Inovace výroby CNC obrábění diskových součástí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. Ústav strojírenské technologie. 37 s. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Inovace výroby CNC obrábění diskových součástí** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Marek Křupka

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc., jakožto vedoucímu diplomové práce za vedení a neocenitelné rady a připomínky při vypracování diplomové práce. Rovněž děkuji společnosti [REDAKCE] za poskytnutou dokumentaci a také pánům Mgr. Michalu Jílkovi a Milanu Rusiňákovi, kteří pomohli realizovat experimenty.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD	8
1. TEORETICKÝ ROZBOR PROBLÉMU	9
1.1. Fyzikální základy procesu tvorby třísky	9
1.2. Práce a výkon při řezání	10
1.3. Měrná řezná síla a řezné síly při soustružení	12
1.3.1. Měrná řezná síla	12
1.3.2. Řezné síly při obrábění	13
1.4. Teplo a teplota při obrábění	14
1.5. Základní tvary třísek	16
1.6. Opotřebení řezných nástrojů	19
1.6.1. Klasifikace typů opotřebení	20
1.6.2. Trvanlivost a životnost řezného nástroje	21
1.6.3. Taylorův vztah	22
1.7. Řezné prostředí	24
1.8. Optimalizace výrobních nákladů a časů	25
1.8.1. Kritérium minimálních výrobních nákladů	25
1.8.2. Kritérium minimálních výrobních časů	27
1.9. Pružinové oceli	28
1.9.1. Vlastnosti oceli 51CrV4	28
UTAJENÁ VERZE DIPLOMOVÉ PRÁCE	30
ZÁVĚR	31
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	32
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	34
SEZNAM PŘÍLOH	37

ÚVOD

Již dlouho je známo, že v obráběcích procesech je více faktorů, které ovlivňují kvalitu procesu. Mezi tyto faktory patří jak správná volba řezných podmínek, jako je řezná rychlost, posuv a hloubka řezu, tak nástrojové parametry, jako je materiál a geometrie nástroje. Všechny tyto faktory jsou důležité zejména z hlediska dosažení vysokých výkonů obrábění, což vede ke zvyšování produktivity. Ve většině případů jsou řezné podmínky a volba nástrojů založeny na zkušenostech, což nezajišťuje, že zvolené podmínky mají optimální parametry pro podmínky dané výroby, nebo parametry, které se ideálům alespoň přibližují. Nicméně nalezení optimálních řezných podmínek a optimální použití nástrojů je velmi těžké. Tato práce se zabývá konkrétní výrobou talířových pružin z pružinové oceli DIN 51CrV4 (dále jen 51CrV4) ve firmě [REDACTED], kde se snaží inovovat stávající proces s používanými řeznými podmínkami a nástroji.

Ocel 51CrV4, ze které jsou tyto pružiny vyráběny, se vyznačuje vysokou prokalitelností, vysokými hodnotami meze únavy při střídavém namáhání a v zušlechtném stavu má velmi příznivý poměr pevnosti k mezi kluzu. Obecně se kalí převážně do oleje nebo do roztoků syntetických polymerů.



Obr. 1 Talířové pružiny [1].

1. TEORETICKÝ ROZBOR PROBLÉMU

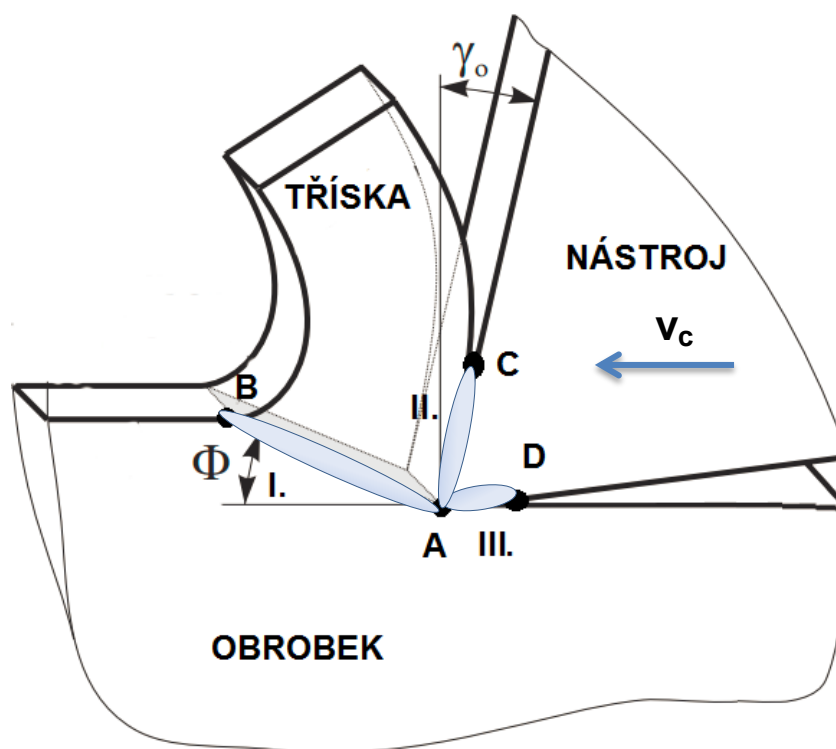
Soustružení je jeden z velmi důležitých technologických procesů, při kterém je přebytečná část materiálu odebírána z obrobku ve formě třísek pomocí specifického silového působení nástroje ve tvaru klínu na obráběný materiál. Takto získáváme součást splňující požadavky konstrukce z hlediska tvarů, rozměrů a kvality. Tento proces, při kterém se odděluje materiál obrobku, se specifikuje jako kontinuální řezný proces. Soustružení je nejpoužívanější metoda pro tvorbu rotačních ploch a pohyb, při kterém dochází k odebírání třísky, se nazývá řezný pohyb. Tento pohyb se skládá ze dvou pohybů – hlavního a vedlejšího. Hlavní pohyb je rotační a vykonává ho obrobek a vedlejší pohyb, posuv, vykonává nástroj [2] [3] [4].

1.1. Fyzikální základy procesu tvorby třísky

Hlavním hodnotícím kritériem při obráběcím procesu jsou parametry obrobené plochy a z toho důvodu je nutné věnovat pozornost procesu tvorby třísky. Proces obrábění je hlavně procesem plastické deformace podél roviny maximálních smykových napětí. Vzhledem k vysoké rychlosti deformace prochází obráběný materiál velmi rychle třemi mezními stavy – stavem pružné napjatosti, plastické deformace a oddělení částic materiálu lomovým porušením. Tyto tři stavy probíhají téměř v jediném okamžiku, proto je při reálných podmínkách velmi složité sledovat posloupnost takového procesu [2] [3].

Oblast materiálu, ve které dochází účinkem řezného nástroje k jeho přetvoření, nazýváme smykovou rovinou, nebo také kořenem třísky. V kořenu třísky se nachází tři oblasti plastické deformace, které jsou ukázány na obrázku 1.1 [2]:

- » oblast primární plastické deformace materiálu I – v rovině maximálních smykových napětí vymezené rovinou **AB** skloněnou o úhel střižné roviny ϕ ,
- » oblast sekundární plastické deformace materiálu II – zahrnuje tření třísky po čele nástroje. Nachází se mezi body **AC**,
- » oblast terciální plastické deformace materiálu III – nachází se mezi body **AD** a zahrnuje tření nástroje o obrobený povrch materiálu a má vliv na výslednou kvalitu obrobeného povrchu.



Obr. 1.1 Oblasti plastických deformací v kořenu třísky

Obecně platí, že čím vyšší je úhel střížné roviny ϕ , tím je štíhlejší tříska, proces je energeticky výhodnější a dochází k nižšímu zatížení a ovlivnění povrchových a podpovrchových vrstev obrobku. Pro soustružení je typickým místem největší plastické deformace i lomového porušení oblast I viz obrázek 1.1 [2].

1.2. Práce a výkon při řezání

Abychom byli schopni oddělit třísku určité délky z materiálu obrobku, musíme vynaložit určitou práci E_e , která se skládá z následujících složek [2]:

$$E_e = E_{pl} + E_{el} + E_t + E_d \quad (1.1)$$

$$E_t = E_\gamma + E_\alpha \quad (1.2)$$

Kde:

E_{pl} - Je to práce nutná k překonání plastických deformací. Tvoří 50÷80% celkové práce E_e .

E_{el} - Práce nutná k překonání elastických deformací materiálu odřezávané vrstvy a materiálu pod břitem nástroje. Tvoří 5÷10 % celkové práce E_e .

E_t - Práce třecí, která se skládá z práce, která je nutná k překonání tření třísky

po čele nástroje (E_γ) a z práce, která je nutná k překonání tření hřbetu nástroje po řezné ploše (E_α). Třecí práce tvoří 20÷40 % celkové práce E_e .

E_d - Práce disperzní. Je to práce, která je potřebná k vytvoření nových povrchů. Tvoří přibližně 1 % celkové práce E_e .

Práce řezného procesu E_e je celková práce na odebrání určitého množství materiálu a stanoví se jako součet práce řezání a práce posuvu. [2]

$$E_e = E_c + E_f \quad [\text{J}] \quad (1.3)$$

Práce řezání E_c je práce potřebná k zajištění hlavního pohybu obrábění, abychom byli schopni zajistit odebrání určitého množství materiálu obrobku: [2]

$$E_c = \int_0^t F_c \cdot v_c \cdot dt \quad [\text{J}] \quad (1.4)$$

Pro soustružení válcové plochy bude po matematické úpravě platit: [2]

$$E_c = F_c \cdot v_c \cdot t_p \quad [\text{J}] \quad (1.5)$$

Kde:

F_c - Řezná síla [N],

v_c - Řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$],

t_p - Čas řezného procesu [min].

Posuvová práce E_f je práce, která je potřebná k zajištění posuvového pohybu pro odebrání určitého množství materiálu [2].

$$E_f = \int_0^t F_f \cdot v_f \cdot dt \quad [\text{J}] \quad (1.6)$$

Pro soustružení válcové plochy bude po matematické úpravě platit [2]:

$$E_f = F_f \cdot v_f \cdot t_p \quad [\text{J}] \quad (1.7)$$

Kde:

F_f - Posuvová síla [N],

v_f - posuvová rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$],

t_p - Čas řezného procesu [min].

Po matematické úpravě potom ze vztahu (1.4) dostaneme vztah pro soustružení válcové plochy [2]:

$$E_c = (F_c \cdot v_c + F_f \cdot v_f) \cdot t_p \quad [\text{J}] \quad (1.8)$$

Příkon obráběcího stroje se určí ze vztahu (1.9)

$$P_c = \frac{P_e}{\eta} \quad [\text{W}] \quad (1.9)$$

Kde:

P_e - Pracovní výkon [W],

η - účinnost stroje [-].

Pracovní výkon P_e je dán součinem pracovní síly F_e a rychlosti řezného pohybu v_e , přičemž F_e i v_e působí v hlavním bodě ostří ve stejném čase [2].

$$P_e = \frac{F_e \cdot v_e}{60} \quad [\text{W}] \quad (1.10)$$

Kde:

F_e je velikost výsledné pracovní síly dle vztahu [2]:

$$F_e = \sqrt{F_c^2 + F_f^2} \quad [\text{N}] \quad (1.11)$$

v_e je velikost rychlosti výsledného řezného pohybu dle vztahu [2]:

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.12)$$

1.3. Měrná řezná síla a řezné síly při soustružení

1.3.1. Měrná řezná síla

Tak jako je u mechaniky těles a nauky o materiálu definována pevnost materiálu v tahu nebo v tlaku, je u teorie obrábění definována velikost měrné síly, která je potřebná k překonání odporu materiálu proti vnikání nástroje a odebírání třísek. V základním tvaru je tato veličina definována rovnicí [2]:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (1.13)$$

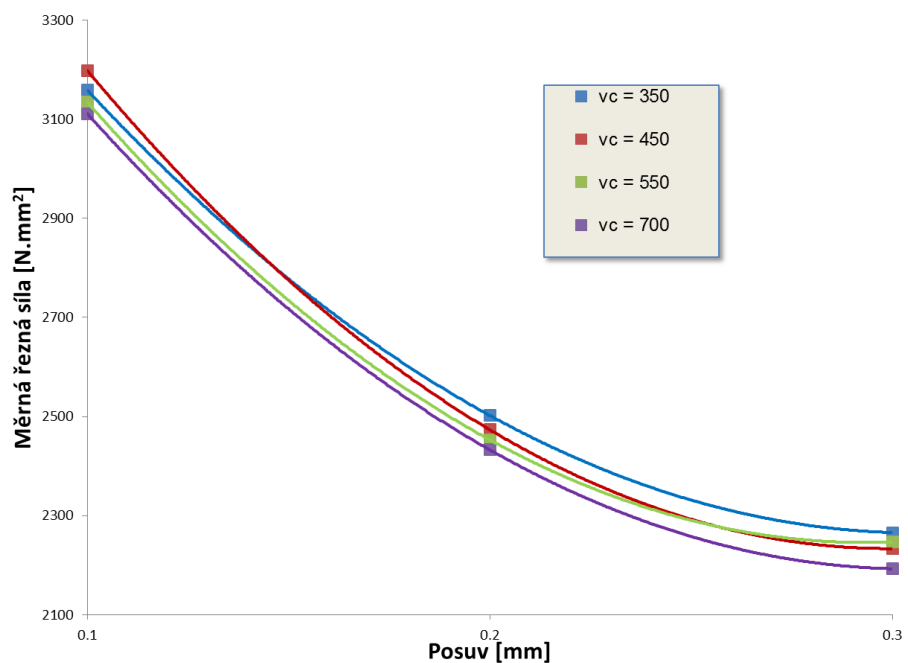
Kde:

F_c - Síla ve směru hlavního řezného pohybu [N],

A_D - průřez třísky [mm^2].

Velikost měrné řezné síly závisí na:

- » fyzikálních vlastnostech materiálu obrobku,
- » velikosti průřezu třísky,
- » geometrii nástroje,
- » řezném prostředí, apod.

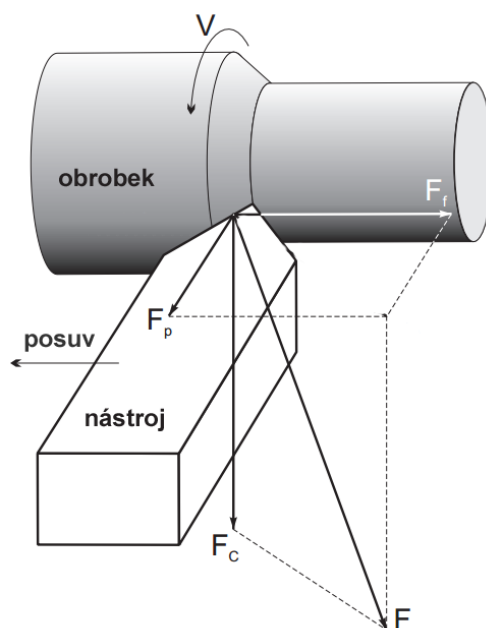


Obr. 1.2 Vliv posuvu a měrné řezné síly na řezné rychlosti.

1.3.2. Řezné síly při obrábění

Řeznou silou při obrábění se rozumí síla, která je potřebná k překonání řezného odporu. Je tedy zřejmé, že řezná síla a řezný odpor jsou spolu ve vztahu akce a reakce, kdy materiál reaguje na působení nástroje.

Celková řezná síla F lze rozložit do tří os – x, y, z , ve směru základních pohybů při soustružení. Viz obrázek 1.3.



Obr. 1.3 Síly při soustružení [5].

Pro celkovou řeznou sílu platí:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad [\text{N}] \quad (1.14)$$

Kde:

F_c tato složka je ve směru základního pohybu. Je největší ze všech složek a představuje 70 ÷ 80 % výsledné síly. Používá se k výpočtu výkonu obráběcího stroje,

F_f axiální složka řezné síly se nazývá posuvová síla,

F_p radiální složka řezné síly se nazývá pasivní síla. Překonává odpor proti vnikání nástroje do hloubky.

1.4. Teplo a teplota při obrábění

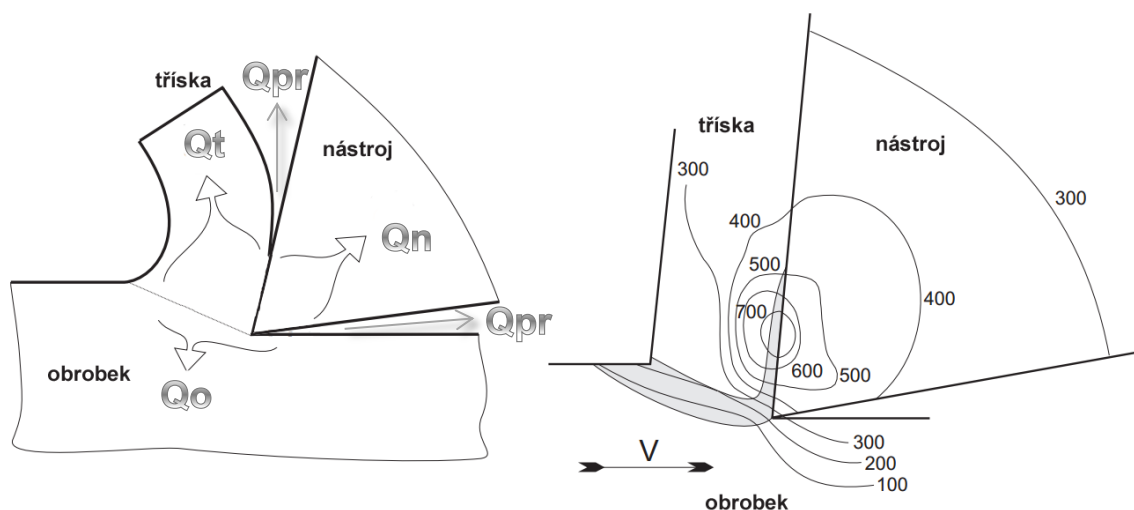
Téměř celá mechanická energie **E_e** , která je vynaložena na tvorbu třísky se během procesu mění v energii tepelnou. Pouze její malá část je uložena jako elastická energie v deformovaných třískách a ve zbytkové napjatosti obrobeného povrchu. Celková tepelná energie **Q** se skládá z několika dílčích složek [2]:

$$Q = Q_{sh} + Q_\gamma + Q_\alpha + Q_{ch} \approx E_e \quad [\text{J}] \quad (1.15)$$

- Q_{sh} – teplo způsobené plastickou deformací ve smykové rovině,
 Q_{γ} – teplo způsobené třením mezi třískou a čelem nástroje,
 Q_{α} – teplo způsobené třením mezi obrobenou plochou a hřbetem nástroje,
 Q_{ch} – teplo způsobené utvářením a dělením třísky.

Teplo vznikající při řezném procesu, je odváděno jednotlivými složkami viz obrázek 1.4:

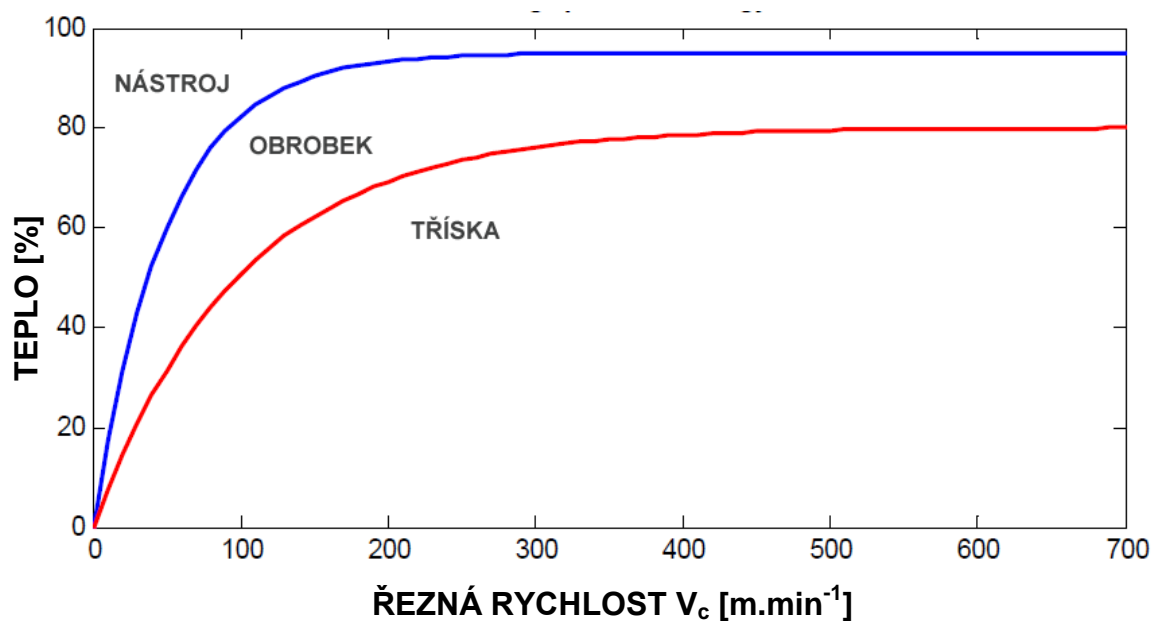
- Q_t – teplo odvedené třískou (75 %),
 Q_o – teplo odvedené obrobkem (5 %),
 Q_n – teplo odvedené nástrojem (18 %),
 Q_{pr} – teplo odvedené řezným prostředím (2 %).



Obr. 1.4 Tepelná bilance řezného procesu [5].

Vzniklé teplo výrazně ovlivňuje řezný proces, protože [2]:

- » negativně působí na řezné vlastnosti nástroje,
- » ovlivňuje mechanické vlastnosti obráběného povrchu,
- » ovlivňuje petchování a zpevňování obráběného materiálu,
- » ovlivňuje podmínky tření na čele i hřbetě nástroje.



Obr. 1.5 Vliv řezné rychlosti na distribuci tepla. [6]

Jak znázorňuje obr. 1.5, rozdělení tepelné energie a poměrný odvod tepla třískou, nástrojem a obrobkem není konstantní a velmi závisí na druhu obráběcí technologie. Při soustružení běžných ocelí je velká část tepla odváděná třískou a tento podíl při rostoucí řezné rychlosti vzrůstá. Zvláště při soustružení řeznou keramikou se odvádí až 95 % tepla. Výrazný vliv na toto rozložení mají tepelné a teplotní vodivosti obráběného materiálu a materiálu řezného. Proto se aplikují otěruvzdorné povlaky, které působí jako izolační štíty, které chrání geometrii nástroje a snižují tok tepla nástrojem [2].

1.5. Základní tvary třísek

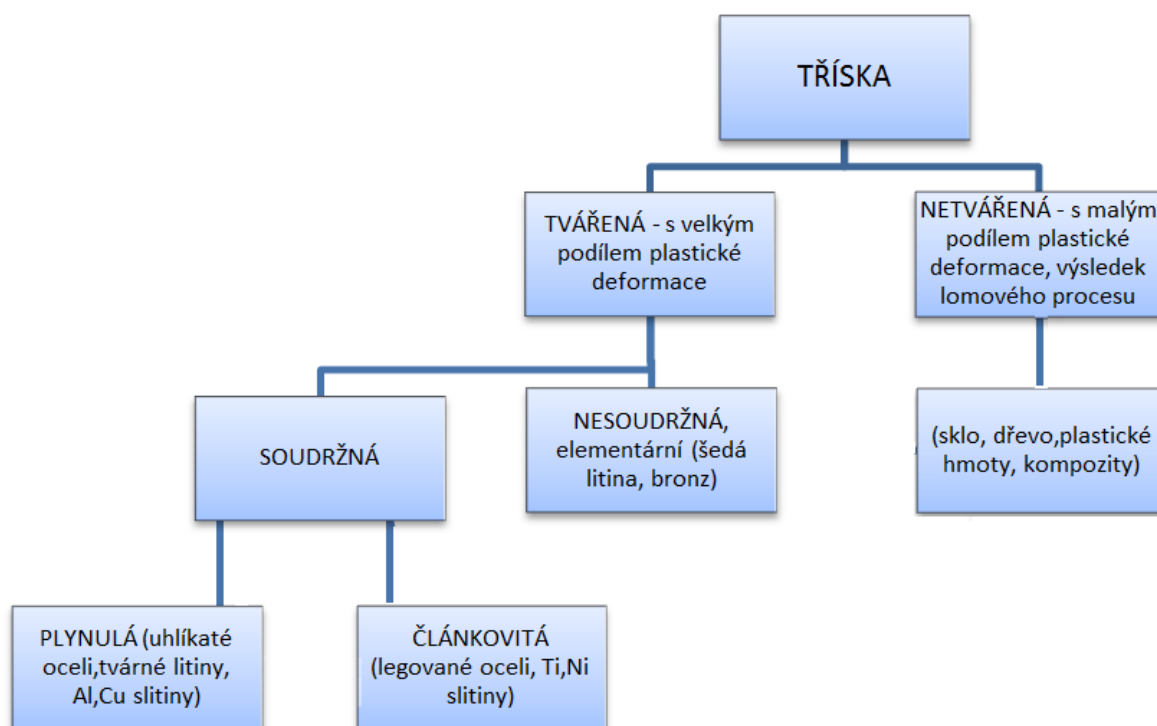
Tříška, jakožto i konečný obrobek, jsou výstupními produkty obráběcího procesu. Z její charakteristiky lze mnohé vypovědět o vlastnostech a průběhu řezného procesu jak z energetického hlediska, tak z hlediska odchodu třísky z řezné zóny. [3].

Tvar třísky je také důležitým faktorem obrábění, který vypovídá o efektivitě a bezpečnosti obrábění a který závisí na mnoha faktorech, z nichž nejdůležitější jsou [2]:

- » vlastnosti obráběného materiálu,
- » geometrie nástroje,

- » řezné podmínky, zejména řezná a posuvová rychlost,
- » tribologie rozhraní tříska-nástroj.

Vzhledem k velké variabilitě tvarů třísek není její terminologie označování jednotná. Na obrázku 1.6 je uvedeno základní rozdělení třísek [2].

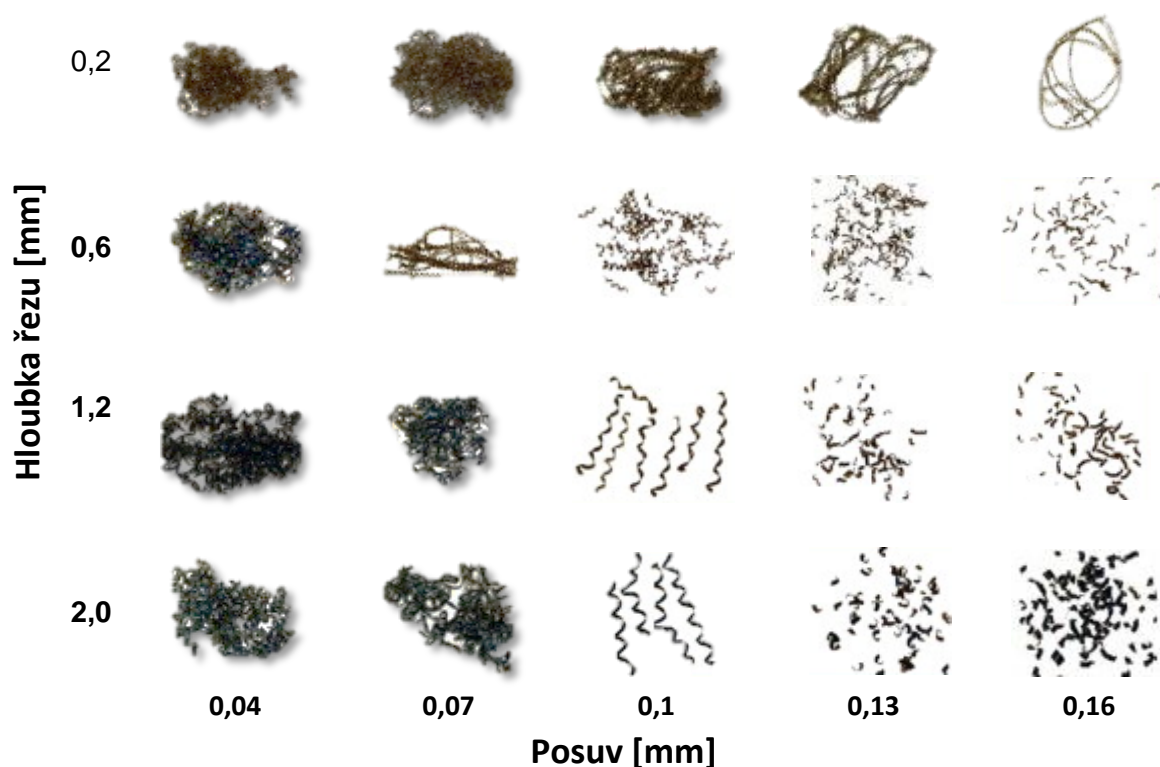


Obr. 1.6 Základní rozdělení druhů třísek [2].

Z hlediska manipulace s třískami by měly mít třísky takový tvar, aby zabíraly co nejmenší objem. Tento požadavek na třísky je zdůrazňován hlavně při obrábění v automatizovaných výrobních systémech [2].

I přes to, že řezná rychlost do značné míry ovlivňuje produktivitu obrábění a konečnou drsnost povrchu, práce při nízkých rychlostech nemusí být žádoucí.

Je-li žádoucí řeznou rychlost udržovat na vysoké úrovni, je potřeba regulovat posuv a hloubku řezu na rozumné úrovni pro regulaci tvaru třísek. Při konstantní řezné rychlosti, tzv. mapa třísek definuje oblast žádoucího typu třísky jako funkce posuvu a hloubky řezu viz obrázek 1.7 [5].



Obr. 1.7 Tvar třísky jako funkce řezných podmínek při soustružení slitiny AlSi [7].

Pro průchod materiálu deformačním procesem a přeměnu v třísku za podmínky přibližného zachování hustoty materiálu platí rovnice spojitosti, tedy kontinuity v obecném tvaru divergence.

$$\operatorname{div} V = 0 \quad (1.16)$$

Pro praktické účely se definuje objemový součinitel třísek **W**, který je dán poměrem objemů volně sypaných třísek a objemu odebraného materiálu. Objemový součinitel umožňuje kvantifikovat stupeň plnění obecných požadavků na rozměry a tvary třísek [2].

$$W = \frac{V_{ch}}{V_m} \quad (1.17)$$

Kde: V_{ch} – Objem volně sypaných třísek [dm³]
 V_m – Objem odebraného materiálu [dm³]

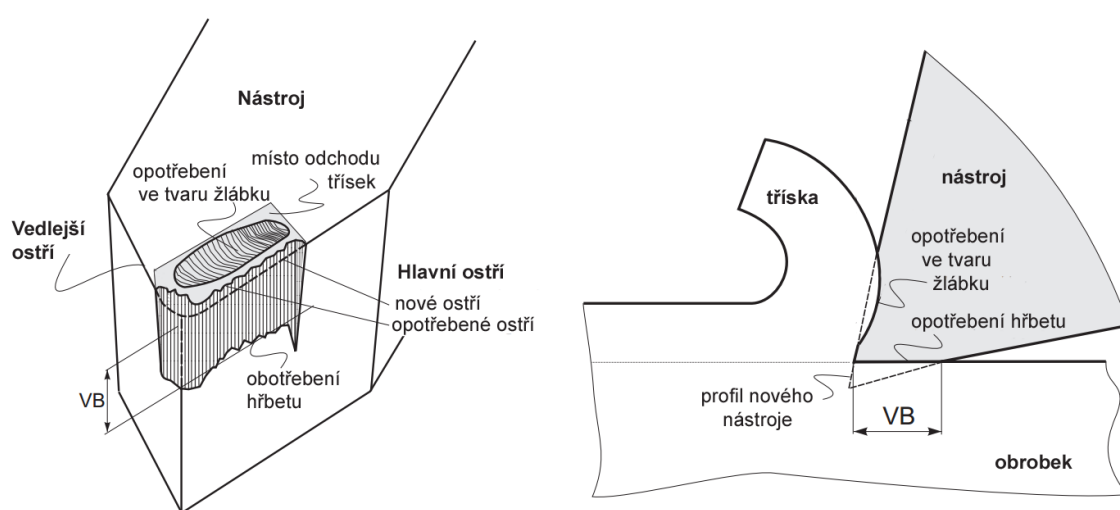
1.6. Opotřebení řezných nástrojů

Během obrábění se nástroj otupuje a jeho řezivost se snižuje. Tato skutečnost se projeví zvýšením řezného odporu a tím i příkonu stroje, chvěním obrobku, zhoršením přesnosti a kvality obrobených ploch. Opotřebení nástroje se obvykle projevuje ztrátou materiálu nástroje na čele nebo hřbetu nástroje. Toto opotřebení lze hodnotit přímo a nepřímo. **Přímo** opotřebení hodnotíme následovně [2]:

- » na mikroskopu pomocí změn opotřebovaných rozměrů břitu v závislosti na čase,
- » měřením hmotnostního úbytku nástroje.

Dále je možno opotřebení zjišťovat **nepřímo** pomocí [2]:

- » velikosti změny sil působících při obrábění,
- » nárůstu výkonu potřebného k obrábění,
- » změny teploty obrobku, nástroje a třísek,
- » změny barvy a tvaru třísek,
- » změny rozměrů na obrobené součásti,
- » nadměrné hlučnosti při obrábění.



Obr. 1.8 Formy opotřebení na řezném nástroji [5].

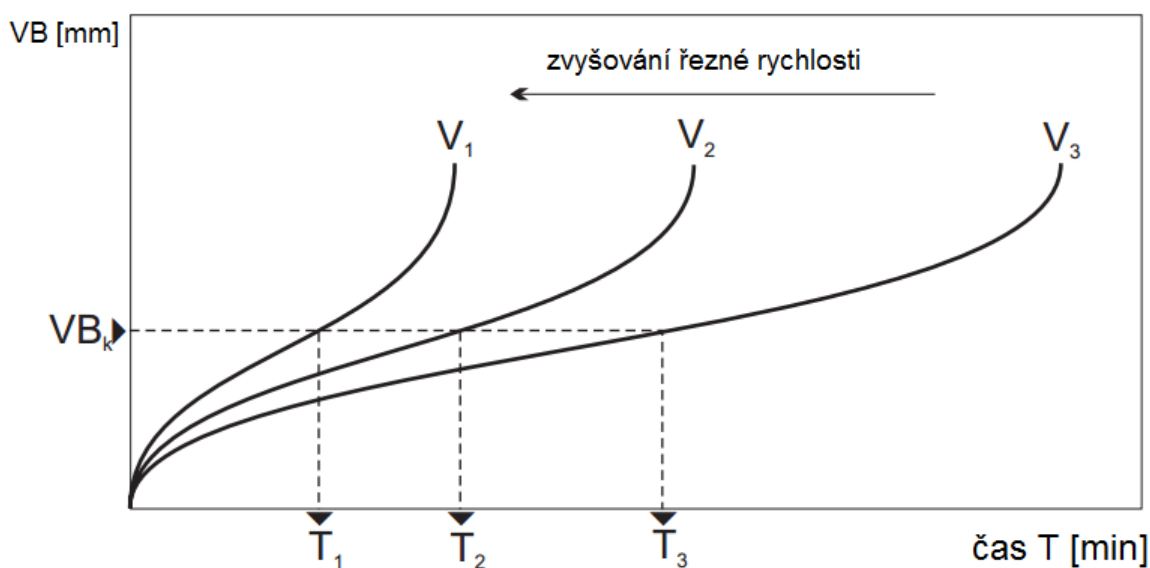
1.6.1. Klasifikace typů opotřebení

Klasifikace typů opotřebení se provádí za účelem posuzování operací obrábění a tím i možnosti ovlivnění produktivity. Pohled na opotřeбенý břit při zvětšení ukazuje, jaká jsou na něm opotřebení a umožňuje kontrolu trvanlivosti a dokonce i možnost jejího prodloužení [8].

- » **Opotřebení na hřbetu** – Patří mezi abrazivní formy opotřebení a je všeobecně obvyklým druhem opotřebení. Příliš velké opotřebení hřbetu má za následek zhoršení kvality obrobeného povrchu, nepřesnost rozměrů a nárůst tření. Viz. obr. 1.8
- » **Opotřebení ve tvaru žlábků** – Je důsledkem působení mechanismů difúzního opotřebení a abraze. Mimořádně velké opotřebení v podobě žlábků může změnit geometrii břitu a ovlivnit tak tvar třísky, změnit směr působení řezné síly a zeslabit tak břit. Viz. obr. 1.8
- » **Opotřebení ve tvaru vrubu** – Patří k typickým adhezním opotřebením. Vruby vznikají v místě kontaktu břitu s bokem třísky a jejich vznik způsobují tvrdé částice materiálu obrobku. Mimořádně velké opotřebení může vést až k lomu destičky.
- » **Tvorba nárůstku** – Tvorba nárůstku souvisí s teplotami a řeznými rychlostmi. Nízké teploty a vysoké tlaky způsobují mezi třískou a čelem nástroje efekt svařování. Následně se potom mohou částice materiálu břitu odlomit společně s navařeným nárůstkem.
- » **Plastická deformace** – Vzniká působením vysokých teplot a vysokých řezných tlaků na břit nástroje. Toto opotřebení má za následek změnu geometrie břitu a změny v odchodu třísek. Toto opotřebení lze redukovat volbou řezného materiálu s vyšší otěruvzdorností a volbou správné geometrie.
- » **Vylamování břitu** – Lom břitu představuje konec funkčnosti nástroje a je nutné jej považovat za konec trvanlivosti. Křehký lom může být způsoben různými faktory, ale velmi často je materiál břitu zvolen málo houževnatý na to, aby mohl zvládnout všechny požadavky na obrábění. Změny geometrie a tím pádem oslabení břitu, nárůst teplot a sil mohou vést k velkým škodám

1.6.2. Trvanlivost a životnost řezného nástroje

Opotřebení nástroje je proces závislý na čase. Jak čas obrábění roste, opotřebení nástroje se zvětšuje, až dojde k určité mezi, kdy už nástroj není schopen výroby dílu požadované kvality. Nejčastějším typem opotřebení je opotřebení hřbetu, které je udáváno parametrem VB (obr. 1.9). Tento parametr nesmí překročit předem stanovenou hranici, která musí být stanovena tak, aby vyráběný díl měl požadovaný tvar, rozměry a kvalitu povrchu.



Obr. 1.9 Vliv řezné rychlosti na opotřebení hřbetu a trvanlivosti [5].

Trvanlivost řezného nástroje se definuje jako součet všech časů řezání od začátku řezání až po opotřebení břitu nástroje na předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria. Trvanlivost nástroje, stejně tak jako opotřebení nástroje, závisí hlavně na metodě obrábění, vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu a řezných podmínkách [2].

Životnost nástroje je celková doba funkce nástroje od jeho prvního použití, až po jeho vyřazení – u břitových destiček v případě, že byly použity všechny jejich břity. Životnost je také definována jako součet všech trvanlivostí, lze ji proto vyjádřit následujícím vztahem [2]:

$$Z = p \cdot \sum_{i=1}^n T_i \quad (1.18)$$

Kde:

p...vyjadřuje, jestli je břitová destička jednostranná ($p=1$) nebo oboustranná ($p=2$),
n...vyjadřuje počet využitelných břitů na jedné straně destičky,
T...Trvanlivost nástroje.

1.6.3. Taylorův vztah

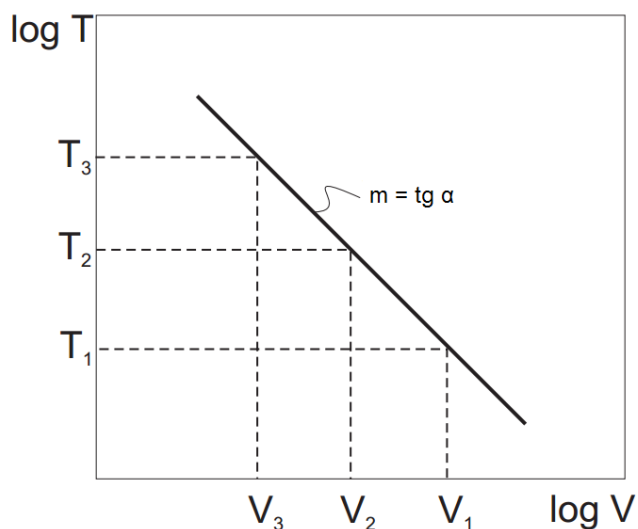
Na začátku 20. století zjistil F. W. Taylor, že z řezných podmínek má největší vliv na trvanlivost nástroje právě řezná rychlost a odvodil vztah pro vzájemnou závislost právě řezné rychlosti a trvanlivosti, který je u nás znám pod názvem „T- v_c závislost“, nebo také „Taylorův vztah“, který je popsán třemi základními vztahy [2]:

$$v_c \cdot T^m = c_v, \quad v_c = \frac{c_v}{T^{1/m}}, \quad T = \frac{c_T}{v^m} \quad (1.19)$$

Často se také používá při přepočtu trvanlivostí ve tvaru:

$$T_1 \cdot v_1^m = T_2 \cdot v_2^m = c_T \quad (1.20)$$

Kde: T – Trvanlivost břitu [min]
 C_T – konstanta [-]
 m – exponent [-]
 v_c – řezná rychlost [m.min⁻¹]
 c_v – konstanta [-]



Obr. 1.20 Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti v logaritmickém tvaru [5].

Konstanta C_T závisí především na materiálu obrobku a nástroje a nabývá hodnot $10^8 \div 10^{12}$ [8].

Velikost exponentu m je charakterizována především vlastnostmi materiálu břítu nástroje. Jeho velikost udává, jaká je citlivost nástrojového materiálu na změnu řezné rychlosti [2] [8].

Nástrojové oceli	$m = 6 \div 10$
Rychlořezné oceli	$m = 5 \div 8$
Slinuté karbidy	$m = 2 \div 5$
Řezná keramika	$m = 1,2 \div 2,5$

Základní Taylorův vztah může být upraven ještě tak, aby bral v úvahu ještě posuv f a hloubku záběru a_p pro danou trvanlivost nástroje T . Tento upravený vztah má tvar [2]:

$$v_c^T = \frac{C_{vT}}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \quad (1.21)$$

Kde:	v_{cT} – řezná rychlost při dané trvanlivosti	[m.min ⁻¹]
	C_{vT} – konstanta	[-]
	a_p – hloubka řezu	[mm]
	p – posuv na otáčku	[mm]
	X_v – exponent vyjadřující vliv hloubky řezu	[-]
	Z_v – exponent vyjadřující vliv posuvu	[-]

Rozšířený Taylorův vztah může být ještě zobecněn tak, aby bral v úvahu trvanlivost T , hodnotu opotřebení VB a celou řadu multiplikačních konstant k_{vci} . [2] :

$$v_c = \frac{C_{v1} \cdot VB^n}{T^{1/m} \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \prod_{i=1}^n K_{vci} \quad (1.22)$$

kde:

$$\prod_{i=1}^n K_{vci} = k_{vc1} \cdot k_{vc2} \cdot k_{vc3} \dots k_{vcn} \quad 1.23$$

Dílčí koeficienty berou v úvahu vliv obrobitelnosti, stavu polotovaru, druhu řezu, fyzického stavu stroje, vliv geometrie nástroje, vliv řezného prostředí, atd [2].

1.7. Řezné prostředí

Fyzikální a chemické vlastnosti prostředí mají významný vliv na parametry řezného procesu. Řezné prostředí tvoří různé složky jako pasty, kapaliny, plyny a mlhy. Všechna tato média jsou koncipována a používána tak, aby měla chladicí, mazací a čistící účinek, provozní stálost, ochranný účinek, zdravotní nezávadnost a přiměřené provozní náklady [8].

- » **Chladicí účinek:** Je schopnost řezného média odvádět teplo z místa řezu. K odvodu vzniklého tepla dochází tím, že řezné médium obklopuje nástroj, třísky i obrobek a přejímá tak část vzniklého tepla. To má příznivý vliv na opotřebení a trvanlivost nástroje i jakost obrobené plochy [8].
- » **Mazací účinek:** K mazacímu účinku dochází díky tomu, že mazací médium vytváří na povrchu obrobku a nástroje vrstvu, která brání přímému styku kovových povrchů a tím snižuje tření. Díky mazacímu účinku dochází ke zmenšení řezných sil, zmenšení spotřeby elektrické energie a také ke zlepšení kvality obrobeného povrchu [8].
- » **Čistící účinek:** Čistící účinek řezného média spočívá hlavně v odvodu třísek z místa řezu [8].
- » **Provozní stálost:** Parametr, podle kterého se posuzuje provozní stálost je doba jeho výměny. Dlouhá doba mezi jednotlivými výměnami média je podmíněna tím, aby se jeho vlastnosti po celou dobu neměnily [8].
- » **Ochranný účinek:** Ochranný účinek provozního média je nutný k ochraně obrobku proti korozi. Tento účinek je důležitý proto, aby nebylo nutné výrobky mezi jednotlivými operacemi konzervovat a aby byl obráběcí stroj chráněn proti korozi [8].
- » **Zdravotní nezávadnost:** Médium nesmí být zdraví škodlivé, nesmí obsahovat látky dráždící sliznici a pokožku, nesmí být jedovaté a nesmí zamořovat životní prostředí [8].
- » **Přiměřené provozní náklady:** Přiměřené provozní náklady souvisí hlavně se spotřebou řezného média. Jedině podrobný technicko-ekonomický rozbor může rozhodnout o vhodnosti určitého druhu řezného média [8].

1.8. Optimalizace výrobních nákladů a časů

Obecně lze říci, že trvanlivost nástroje závisí na řezných podmínkách. Určení konkrétní hodnoty trvanlivosti se provádí pro dvě výchozí podmínky. Tyto podmínky jsou minimální výrobní náklady a maximální výrobnost za jednotku času (minimální výrobní časy) [9].

1.8.1. Kritérium minimálních výrobních nákladů

Optimalizaci výrobních nákladů můžeme provádět buď s ohledem na výpočet optimální řezné rychlosti, nebo optimální trvanlivosti nástroje. Celkové výrobní náklady na 1 kus **N_c** se vyjádří jako součet dílčích složek [2]:

$$N_C = N_S + N_N + N_V \quad [Kč] \quad (1.24)$$

Kde: **N_S** – náklady na strojní práci [Kč]

N_N – náklady na nástroj [Kč]

N_V – náklady na vedlejší práci [Kč]

Náklady na strojní práci souvisí s jednotkovým strojním časem, který je potřebný k obrobění jednoho kusu obrobku [9]:

$$N_S = t_{AS} \cdot \frac{N_{sn}}{60} \quad [Kč] \quad (1.25)$$

Kde: **t_{AS}** – jednotkový strojní čas [min]

N_{sn} – hodinová sazba stroje [Kč.hod⁻¹]

Jednotkový strojní čas **t_{AS}** je pro většinu obráběcích metod definován obecným vztahem [9]:

$$t_{AS} = \frac{l_n + l + l_p}{n \cdot f} \quad [min] \quad (1.26)$$

Kde: **l_n** – dráha náběhu [mm]

l – obráběná dráha [mm]

l_p – dráha přeběhu [mm]

n – otáčky [min⁻¹]

f – posuv na otáčku [mm.ot⁻¹]

Prostřední člen rovnice odpovídá nákladům na nástroj a jeho výměnu N_T , vztáženým na jednu trvanlivost bříty a počet obrobených kusů tímto břitem Q_T .

$$N_N = \frac{N_T}{Q_T} [Kč] \quad (1.27)$$

Kde: N_T – náklady na nástroj a jeho výměnu [Kč]
 Q_T – počet obrobených kusů [-]

Náklady na nástroj N_T a jeho výměnu lze vyjádřit:

$$N_T = \frac{N_1}{n_b} + \frac{N_2}{z} + N_3 \quad (1.28)$$

Kde: N_1 – cena VBD [Kč]
 N_2 – cena držáku [Kč]
 N_3 – náklady na upnutí a seřízení [Kč]
 n_b – počet břitů VBD [-]
 z – životnost nástroje

Podobně lze vyjádřit náklady na vedlejší práci N_V :

$$N_V = t_{AV} \cdot \frac{D_V}{60} [Kč] \quad (1.29)$$

Kde: t_{AV} – jednotkový vedlejší čas [min]
 D_V – hodinová sazba stroje na vedlejší práce [Kč.hod⁻¹]

$$D_V = M \cdot \left(1 + \frac{R}{100}\right) [Kč] \quad (1.30)$$

Kde: M – mzda dělníka pro vedlejší práce [Kč.hod⁻¹]
 R – Režie dílny pro vedlejší práce [Kč.hod⁻¹]

Zjednodušeně lze náklady na obrábění vztážené k 1 kusu (minimální náklady) stanovit jako [2]:

$$N_C = t_{AS} \cdot \frac{N_{sn}}{60} + \frac{N_T}{Q_T} + t_{AV} \cdot \frac{D_V}{60} [Kč] \quad (1.31)$$

Optimalizace výrobních nákladů lze z užšího pohledu provést vhodnou volbou rezných parametrů obrábění s ohledem na vzájemnou závislost [2]:

- a) optimální řezné rychlosti z hlediska minimálních nákladů,
- b) optimální trvanlivosti nástroje z hlediska minimálních nákladů.

Základním empirickým vztahem pro určení optimálních řezných podmínek je vazba na trvanlivost bříty, reprezentovaná Taylorovým vztahem [2].

Ad a) Optimální řezná rychlost z hlediska minimálních nákladů [2]:

$$v_{c\ opt} = \left(\frac{c_T}{\lambda} \cdot \frac{N_{SM}}{N_T \cdot (1 - m)} \right)^{1/m} = \frac{c_T}{T_e^{1/m} \cdot f_y \cdot a_p^x} [m \cdot min^{-1}] \quad (1.32)$$

Ad b) Optimální trvanlivost nástroje pro kritérium minimálních nákladů: [2]

$$T_{opt_1} = (m - 1) \cdot \lambda \cdot \frac{N_T}{N_{SM}} \quad (1.33)$$

1.8.2. Kritérium minimálních výrobních časů

Cílem této optimalizace je optimalizace výroby pro dosažení minimálního výrobního času, což v podstatě odpovídá maximální výrobnosti. Z tohoto pohledu je výhodné vycházet při výpočtu z rozboru výrobního času na jeden vyrobený kus, úsek či operaci [2]:

$$t_A = t_{AS} + t_N + t_{AV} [min] \quad (1.34)$$

Kde:

- t_A – operační čas jednotkové práce [min]
- t_{AS} – jednotkový strojní čas [min]
- t_N – čas na výměnu nástroje na všechny kusy [min]
během trvanlivosti nástroje
- t_{AV} – jednotkový vedlejší čas [min]

Dílčí výpočty lze rozepsat na tvary, které jsou obdobné jako u výše zmiňovaných minimálních nákladů [2].

t_{AS} , viz vztah 1.26.

$$t_N = \frac{t_{Ax}}{Q_T} [min] \quad (1.35)$$

Kde:

- t_{Ax} – čas výměny nástroje [min]
- Q_T – počet obrobených kusů [-]

$$Q_T = \frac{T}{\lambda \cdot t_{AS}} = \frac{T \cdot v_f}{\lambda \cdot L} = \frac{T \cdot n \cdot f}{\lambda \cdot L} \quad [-] \quad (1.36)$$

Po dosazení do rovnice (1.34) bychom potom dostali [2]:

$$t_A = \frac{l_n + l + l_p}{n \cdot f} + \frac{t_{Ax} \cdot \lambda \cdot L}{T \cdot n \cdot f} + t_{AV} \quad [min] \quad (1.37)$$

Pro získání optimální trvanlivosti z hlediska maximální výrobnosti je nutné vyřešit průběh funkce $t_A = f(T)$ a vyřešit její extrémní hodnotu pomocí derivace [2]:

$$\frac{dt_A}{dT} = 0 \quad (1.38)$$

Potom **optimální trvanlivost nástroje** z hlediska maximální výrobnosti je [2]:

$$T_q = (m - 1) \cdot \lambda \cdot t_{Ax} \quad (1.39)$$

Výpočet **optimální řezné rychlosti** pro kritérium maximální výrobnosti je stejný jako v případě minimálních nákladů, jen s rozdílem záměny parametru T_e za T_q [2]:

$$v_{c \text{ opt}} = \frac{C_T}{T_q^{1/m} \cdot f^y \cdot a_p^x} \quad [m \cdot min^{-1}] \quad (1.40)$$

1.9. Pružinové oceli

Pružinové oceli jsou nízko legované oceli, uhlíkové oceli, s vysokým obsahem uhlíku a s vysokou mezí kluzu. Vysoká mez kluzu jim výrazné ohýbání s možností vrátit se do původního stavu bez deformace. Pružinové oceli se vyznačují středně až vysokým obsahem uhlíku, kdy se jeho podíl pohybuje od 0,5% do 1%. Další významné prvky, které se v pružinových ocelích vyskytují, jsou Mangan, Křemík a Chrom. Tyto materiály mohou být použity až do 350 °C [10].

1.9.1. Vlastnosti oceli 51CrV4

Ocel 51CrV4 je nízko legovaná Chrom – Vanadová ocel s vysokou prokalitelností pro velmi namáhané strojní díly. V zušlechtném stavu má velmi dobrý poměr pevnosti a meze kluzu, ale oproti Chrom – Molybdenovým ocelím má nižší houževnatost. Vyznačuje se vysokými hodnotami meze kluzu při střídavém namáhání a proto je vhodná pro výrobu zušlechtěných pružin. Obrábí se ve stavu po žhání na měkko. Pro tváření za tepla se doporučuje rozmezí teplot

850 °C ÷ 1150 °C. Kalí se převážně do oleje a do roztoků syntetických polymerů [18].

Tab. 1.1 Chemické složení oceli 51CrV4 [11]

	C	Si max	Mn	P max	S max	V
Chemické složení [%]	0,45 ÷ 0,57	0,43	0,66 ÷ 1,15	0,03	0,04	0,08 ÷ 0,27

Tab. 1.2 Teploty tepelného zpracování oceli 51CrV4 [11]

	Normalizační žihání [°C]	Žihání měkko [°C]	na Teplota kalení [°C]	Teplota popouštění [°C]
Tepelné zpracování	850 ÷ 890	680 ÷ 720	820 ÷ 860	540 ÷ 680

Body přeměny:

» $A_{c1} = 740\text{ °C}$

» $A_{c1} = 740\text{ °C}$

UTAJENÁ VERZE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Plná verze diplomové práce nemůže být z důvodu utajení zveřejněna. Kompletní utajená verze diplomové práce obsahuje:

- » 78 stran,
- » 74 obrázků,
- » 41 vztahů,
- » 15 tabulek,
- » 20 stran příloh.

ZÁVĚR

Z důvodu utajení není závěr ve veřejné práci k dispozici.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Westley Engineering Blog. *Using Disc Springs*. [online]. 2012 [vid. 2013-04-24]. Dostupné z:
<http://www.universalsourcingnetwork.co.uk/images/discL.jpg> 6
2. FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 220 s. ISBN 80-214-2374-9.
3. KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
4. MÁDL, J., KAFKA, J., VRABEC, M., DVOŘÁK, R. *Technologie obrábění*. 3.díl. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000, 81s.
5. BISSACCO, G. *Material removal process*. Copenhagen : DTU Mechanical Engineering, 2012.
6. MARINOV, V. *Manufacturing technology*. Fargo, North Dakota, 2009.
7. HAGIWARA, M., CHEN, S., JAWAHIR, I.S. *Contour finish turning operations with coated grooved tools: Optimization of machining performance*. Lexington : Elsevier, 2009, 342s.
8. BRYCHTA, J., ČEP, R., NOVÁKOVÁ, J., PETŘÍKOVSKÁ, L. *Technologie II - 1. díl*. Ostrava : VŠB - TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1641-8.
9. KOČMAN, K., PROKOP, J. *Speciální technologie – obrábění. Řešené příklady*. Akademické nakladatelství CERM, 2003, 127s.
10. Oberg, E. *Machinery's Handbook (26th edition ed.)*. New York: Industrial Press Inc., 2000. ISBN 0-8311-2635-3.
11. European steel and alloy grades. *Chemical composition of 51CrV4*. [online]. 2011 [vid. 2013-04-21]. Dostupné z:
http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=198
12. Píška, M. *Rozvoj moderních strojírenských technologií využitím progresivních CAD-CAM a CNC aplikací*. [online]. 2012 [vid. 2013-05-02]. Dostupné z:
http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/rozvoj/Vybaveni_CNC_KISTLER_JC.pdf

13. Indiamart: *CNC Lathe Gildemeister CTX 400 Series 2*. [online]. 2009 [vid. 2013-05-02]. Dostupné z:
<http://trade.indiamart.com/details.mp?offer=4574648346>
14. Cejnarová, A., *Jak správně zvolit chlazení pro obráběcí stroj*, MM spektrum [online]. 2005, roč. 9, č.5 [vid. 2013-08-05]. Dostupné z
<http://www.mmspektrum.com/clanek/jak-spravnezvolit-chlazen-pro-obrabeci-stroj>
15. *Vysokotlaké a velkoobjemové chlazení* CHIPBLASTER TECHNOLOGY–SUPPORT, spol s.r.o. Česká republika. Srpen 2008.
16. PAVLOK, Bohuslav, *Moderní čištění hydraulických olejů*, mm spektrum [online]. 2008, roč.12, č.1 [vid. 2009-06-03]. Dostupné z
<http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-metody-cistenihydraulickych-oleju>
17. DAVIS, J.R. Tool Materials. ASM Specialty Handbook. ASM International, Materials Park, Ohio, 1998, 2nd. ed., pp. 501, ISBN: 0-8170-545-1.
18. PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu I*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, tisk FINAL TISK Olomoučany, 2001, 1. vyd., 516 s.,ISBN 80-7204-193-2.
19. DUDZINSKI, D., SCHULTY, H. *Metal Cutting and High Speed Machining*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2001, 1st. ed., pp. 490, ISBN 0-306-46725-9.
20. TLUSTY, J. *Manufacturing Process and Equipment*. 1st edition. Prentice Hall, 1999. 928 s. ISBN 10-0201498650. 2001, 1. vyd., 360 s.,ISBN 80-7204-130-4

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CNC	[-]	Computer Numerical Control
CVD	[-]	Chemical Vapor Deposition
SK	[-]	Slinutý karbid
VBD	[-]	Vyměnitelná Břitová Destička

Symbol	Jednotka	Popis
A_D	$[mm^2]$	Průřez třísky
D_a	$[mm]$	Vnější průměr talířové pružiny
D_i	$[mm]$	Vnitřní průměr talířové pružiny
D_v	$[Kč.hod^{-1}]$	Hodinová sazba stroje na vedlejší práce
E_c	$[J]$	Práce potřebná k zajištění hlavního pohybu obrábění
E_d	$[J]$	Práce disperzní
E_e	$[J]$	Práce nutná k oddělení třísky určité délky
E_{el}	$[J]$	Práce nutná k překonání elastických deformací materiálu
E_f	$[J]$	Práce, která je potřebná k zajištění posuvového pohybu
E_{pl}	$[J]$	Práce nutná k překonání plastických deformací.
E_t	$[J]$	Práce třecí
E_α	$[J]$	Práce, která je nutná k překonání tření hřbetu nástroje
E_Y	$[J]$	Práce, která je nutná k překonání tření třísky po čele nástroje
F_c	$[N]$	Řezná síla
F_e	$[N]$	Pracovní síla
F_f	$[N]$	Posuvová síla
F_p	$[N]$	Pasivní síla
M	$[Kč.hod^{-1}]$	Mzda dělníka
N_1	$[Kč]$	Cena VBD
N_2	$[Kč]$	Cena držáku
N_3	$[Kč]$	Náklady na upnutí a seřízení
N_c	$[Kč]$	Celkové výrobní náklady na 1 kus

N_n	[Kč]	Náklady na nástroj
N_s	[Kč]	Náklady na strojní práci
N_{sn}	[Kč.hod ⁻¹]	Hodinová sazba stroje
N_t	[Kč]	Náklady na nástroj a jeho výměnu
N_v	[Kč]	Náklady na vedlejší práci
P_c	[W]	Příkon obráběcího stroje
P_e	[W]	Pracovní výkon
Q	[J]	Celková tepelná energie
Q_{ch}	[J]	Teplo způsobené utvářením a dělením třísky
Q_o	[J]	Teplo odvedené nástrojem
Q_{pr}	[J]	Teplo odvedené řezným prostředím
Q_{sh}	[J]	Teplo způsobené plastickou deformací
Q_t	[J]	Teplo odvedené třískou
Q_n	[-]	Počet obrobených kusů
Q_α	[J]	Teplo způsobené třením mezi obrobenou plochou a hřbetem nástroje
Q_γ	[J]	Teplo způsobené třením mezi třískou a čelem nástroje
R	[Kč.hod ⁻¹]	Režie dílny
R_a	[μ m]	Střední aritmetická hodnota drsnosti
T	[hod]	Trvanlivost nástroje
V_{ch}	[dm ³]	Objem volně sypaných třísek
V_m	[dm ³]	Objem odebraného materiálu
W	[-]	Objemový součinitel třísek
x_v	[-]	Exponent vyjadřující vliv hloubky řezu
Z	[hod]	Životnost nástroje
z_v	[-]	Exponent vyjadřující vliv posuvu
a_p	[mm]	hloubka záběru
C_T	[-]	Materiálová konstanta
k_c	[N.mm ²]	Měrná řezná síla
l	[mm]	Dráha
l_n	[mm]	dráha náběhu
l_p	[mm]	dráha přeběhu

m	$[-]$	Exponent
n	$[\text{min}^{-1}]$	Otáčky
n_b	$[-]$	Počet břitů VBD
p	$[\text{mm.ot}^{-1}]$	Posuv na otáčku
r_ϵ	$[\text{mm}]$	Rádus špičky
t	$[\text{min}]$	Čas řezného procesu
t_A	$[\text{min}]$	Operační čas jednotkové práce
t_{AS}	$[\text{min}]$	Jednotkový strojní čas
t_{Av}	$[\text{min}]$	Jednotkový vedlejší čas
t_{Ax}	$[\text{min}]$	Čas výměny nástroje
t_N	$[\text{min}]$	čas na výměnu nástroje na všechny kusy
t_p	$[\text{min}]$	Čas řezného procesu
v_c	$[\text{m.min}^{-1}]$	Řezná rychlost
v_e	$[\text{m.min}^{-1}]$	Rychlost řezného pohybu
v_f	$[\text{m.min}^{-1}]$	Posuvová rychlost
η	$[-]$	Účinnost stroje

SEZNAM PŘÍLOH

Z důvodu utajení není seznam příloh ve veřejné práci k dispozici.

Příloha 1

Příloha 2

Příloha 3

Příloha 4

Příloha 5

Příloha 6